

直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算

陈宇良 刘杰 吴辉琴 晏方

Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear

CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, YAN Fang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响

Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete

复合材料学报. 2020, 37(10): 2602–2609 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200316.002>

钢纤维-橡胶/混凝土抗剪性能试验

Experimental study on shear behavior of steel fiber-rubber/concrete

复合材料学报. 2020, 37(12): 3201–3213 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200507.005>

自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力学性能

Mechanical property of self-compacting lightweight aggregate concrete under combined compression-shear stress

复合材料学报. 2019, 36(8): 1984–1994 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181030.002>

钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响

Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1763–1773 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191106.001>

聚丙烯纤维增强混凝土干接缝的抗剪性能

Shear strength of polypropylene fiber reinforced concrete dry joints

复合材料学报. 2018, 35(7): 1963–1974 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.003>

基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征

Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image

复合材料学报. 2020, 37(7): 1774–1784 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.002>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001

直剪作用下再生混凝土力学性能及
 强度指标换算



陈宇良, 刘杰, 吴辉琴*, 晏方
 (广西科技大学 土木建筑工程学院, 柳州 545006)

摘 要: 以再生粗骨料取代率为变化参数, 通过 75 个再生混凝土 (RAC) 试件的直剪、抗压与劈裂抗拉试验, 揭示了 RAC 的直剪破坏机制及不同强度指标之间的换算规律。结果表明: RAC 在直剪作用下为明显的脆性破坏, 粗骨料和水泥基体均被剪断; 随着取代率的增加, RAC 直剪强度较普通混凝土变化不大, 总体上呈降低趋势, 但 50% 取代率 (按质量) 时直剪强度有所增大; 峰值剪切变形随取代率的增大, 总体呈增大趋势, 平均提高了 18.85%; 初始剪切变形模量随取代率的增大, 总体呈降低的趋势, 平均降低了 8.97%; 最后, 基于试验数据提出了 RAC 剪切强度与抗压、劈裂抗拉强度的换算关系式, 计算结果与试验值吻合较好。
 关键词: 再生混凝土; 直剪; 抗剪强度; 力学性能; 强度指标
 中图分类号: TU528.01 TU317.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2021)11-3962-09

Mechanical properties and strength index conversion of
 recycled aggregate concrete under direct shear

CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin*, YAN Fang
 (College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In order to study the effect of replacement rate of recycled aggregate concrete (RAC) on the direct shear performance of concrete, 75cubic specimens incorporating different replacement rates of RCA were fabricated. The direct shear test, compressive strength test and splitting tensile strength test were carried out. The failure mechanism of direct shear and the conversion rule between different strength indexes of RAC were revealed. The results show that RAC is obviously brittle failure under direct shear and both the coarse aggregate and cement matrix are sheared. With the increase of the replacement rate, the direct shear strength of RAC has little change compared with the ordinary concrete, and shows a decreasing trend in general. However, the direct shear strength of RAC increases when the replacement rate is 50% (by mass). The peak shear deformation generally increases by 18.85% and the initial shear deformation modulus decreases by 8.97% on average. Finally, based on experimental data, the conversion relationship of RAC between the shear and the compressive and split tensile strength was proposed. The calculated results are in good agreement with the experimental values.
 Keywords: recycled aggregate concrete; direct shear; shear strength; mechanical properties; strength index

再生混凝土 (RAC) 既能实现废弃混凝土的循环利用, 又能解决天然骨料资源紧缺的问题。国内外学者对其性能进行了大量的研究, 研究表明: RAC 强度、和易性低于普通混凝土^[1-3]; 微观结构中再生粗骨料周围形成明显的大孔网络^[4-5]; RAC 透水性能较普通混凝土好^[6]; RAC 抗冲击性能劣于普通混凝土^[7]。结构构件除了发生受压、受拉及受弯破坏之

收稿日期: 2020-11-26; 录用日期: 2021-01-11; 网络首发时间: 2021-01-22 09:45:26
 网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.001>
 基金项目: 国家自然科学基金 (51908141); 广西科技基地和人才专项 (AD19110068); 广西自然科学基金 (2019GXNSFBA245030); 广西水工程材料与结构重点实验室 (GXHRI-WEMS-2020-05); 广西科技大学博士基金项目 (校科博 18Z09)
 通信作者: 吴辉琴, 教授, 硕士生导师, 研究方向为绿色建材、先进材料及其应用 E-mail: whq6329@163.com
 引用格式: 陈宇良, 刘杰, 吴辉琴, 等. 直剪作用下再生混凝土力学性能及强度指标换算 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3962-3970.
 CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, et al. Mechanical properties and strength index conversion of recycled aggregate concrete under direct shear[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(11): 3962-3970(in Chinese).

外，在实际工程中往往更多的是发生以剪切为主的破坏，加之受剪破坏的力学分析较复杂，因此有关剪切性能的研究一直以来都是学术和工程界热点关注的方向。刘凯华^[8]采用薄壁圆筒形受扭试验研究了 RAC 的受剪性能，表明随再生粗骨料取代率的增加，混凝土的剪切模量和抗剪强度呈现不同程度降低，混凝土的纯剪强度约为轴心抗压强度的 0.07 倍；Waseem 等^[9]采用 Z 形柱试件研究 RAC 强度等级、法向力、取代率对抗剪强度的影响，并提出了抗剪强度计算式。LIU B 等^[10]采用四点等高变宽梁研究再生骨料类型对 RAC 抗剪强度、峰值应变及剪切模量的影响，并提出了相应换算公式。邓志恒等^[11]、王玉梅等^[12]采用真三轴试验机对 RAC 压剪复合受力性能进行了研究，提出了 RAC 剪切强度计算式。上述研究的试验手段常由于存在一定的偏心，引起弯曲效应、旋转效应，导致其抗剪强度及强度换算关系差异性较大^[13-14]。因此，本文基于现有文献的试验方法，自行研发了一套可消除附加外力影响的直剪试验加载系统，对 75 个 RAC 试件进行直剪、抗压与劈裂抗拉试验，研究 RAC 剪切性能及强度指标，揭示直剪状态下 RAC 破坏机制，为丰富 RAC 理论研究提供了参考依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

以再生粗骨料取代率 r 为变化参数，配置了 11 种再生混凝土 (RAC)(取代率(按质量) r 为 0wt%~100wt%，级差为 10wt%)，试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm，共设计 75 个试块进行直剪试验、抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验，其中，劈裂抗拉强度试验仅考虑 0wt%、50wt%、100wt% 三种取代率。

1.2 试验材料

再生骨料来源于某试验室废弃试块，其强度等级为 C30、碎石类混凝土，经鄂式破碎机破碎、筛分后得到，粒径为 5~20 mm，连续级配；天然粗骨料选用粒径和级配与再生粗骨料相同的骨料；

水泥采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥；拌合用水为城市自来水；细骨料为某市河砂，细度模数为 2.38，Ⅱ区中砂，表观密度为 2 580 kg/m³。

1.3 粗骨料物理性能试验

按照国家标准规范 GB/T 14685—2011^[15] 规定的试验方法，分别测试天然粗骨料 (NCA)、再生粗骨料 (RCA) 的物理性能，试验结果见表 1。可见：再生粗骨料与天然骨料相比，含水率、吸水率、压碎指标均明显增大，表观密度、堆积密度有所降低。

1.4 配合比设计

RAC 的配合比设计参考 JGJ 55—2011^[16]，名义水灰比取 0.55。以取代率 r 为 0wt% 混凝土 (即普通混凝土) 作为基准混凝土，各组配合比中，严格保持水胶比 (m_w/m_b)、水泥 (C)、砂 (S)、粗骨料 (CA) 的总量不变，RAC 配合比设计时考虑再生骨料吸水率高的特点，增加附加用水 (W_a) 进行补偿，详见表 2。

1.5 加载装置及加载方法

基于中国科学院武汉岩土力学研究所 RMT-301 电液伺服机的加载及测量装置，研发了一套直剪试验加载系统^[17]。试件的直剪加载装置、受力模型、剪切盒详图及剪切装置详图如图 1 所示，剪切盒由特制金属制成，主要包括上剪切盒、下剪切盒两部分，上剪切盒右端设置有一大刚度的圆弧形自调杆，自调杆与限位板相连，两者共同作用以减小或消除试验过程中，因偏心所产生的弯矩或扭矩的不利影响；首先将试件放入剪切盒中，剪切盒置于上、下滚轴板之间，上、下滚轴可降低摩擦作用，此时剪切盒与试块接触的受力面、上剪切盒的圆弧形自调杆与限位板的接触面处于同一平面上，使试块处于纯剪的受力状态。正式试验前，对剪切盒的垂直和水平方向分别施加预荷载，以消除试验装置之间的孔隙；预加载完成后，采用位移控制的加载制度进行试验，当试件破坏且处于摩擦状态时停止试验，位控的加载速率为 0.02 mm/s。

表 1 粗骨料基本物理性能
Table 1 Physical properties of coarse aggregates

Coarse aggregate	Water content (by mass)/wt%	Water absorption (by mass)/wt%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Stacking density/(kg·m ⁻³)	Crushing indicators/%
NCA	0.098	0.309	2 714	1 412	19.89
RCA	0.715	1.680	2 579	1 274	22.80

Notes: NCA—Natural coarse aggregate; RCA—Regenerate coarse aggregate.

出的是再生骨料及水泥基体碾碎成的细小颗粒，图中的白色区域为剪切摩擦区域。可见：(1)RAC试件破坏后正面大致呈一条水平直裂缝，侧面为一条有一定锯齿状的贯穿裂缝，随着取代率的增加，锯齿的角度增大。试件剪切破坏后均表现出一定的“剪胀”现象(剪切后试块高度差)，随取代率增加“剪胀”现象较轻，这是由于取代率越大RAC试件中的再生粗骨料脱落并被碾碎成细小颗粒越多，导致“剪胀”现象变轻。(2)RAC剪切破坏形态为骨料与水泥基体之间界面的黏结破坏与粗骨料本身的剪断破坏形式，试件破坏时发出“嘭”的一声，荷载急剧下降，混凝土被剪切为两块，破坏前无任何预兆，属于典型的脆性破坏。

此后，由于剪切摩擦作用再生粗骨料及水泥基体被碾碎成细小颗粒，天然粗骨料保持着较好的完整性，这是由于再生粗骨料内部有大量微裂缝导致其强度相较天然粗骨料低，因此在剪切摩擦作用下，再生骨料脱落并被碾碎成细小颗粒。

图3分别为RAC立方体试件抗压和劈裂抗拉强度破坏形态。可见：(1)抗压破坏过程及形态与普通混凝土相似，破坏时均伴随着混凝土大面积剥落，最终破坏形态呈四角锥状，RAC破坏时试块表面混凝土剥落更多，破坏程度较普通混凝土要大，表现出明显地脆性破坏特征；(2)直剪与劈裂抗拉强度试验试块的正面均呈现出较规整的一字形贯穿裂缝，直剪断面与劈拉断面均为骨料本

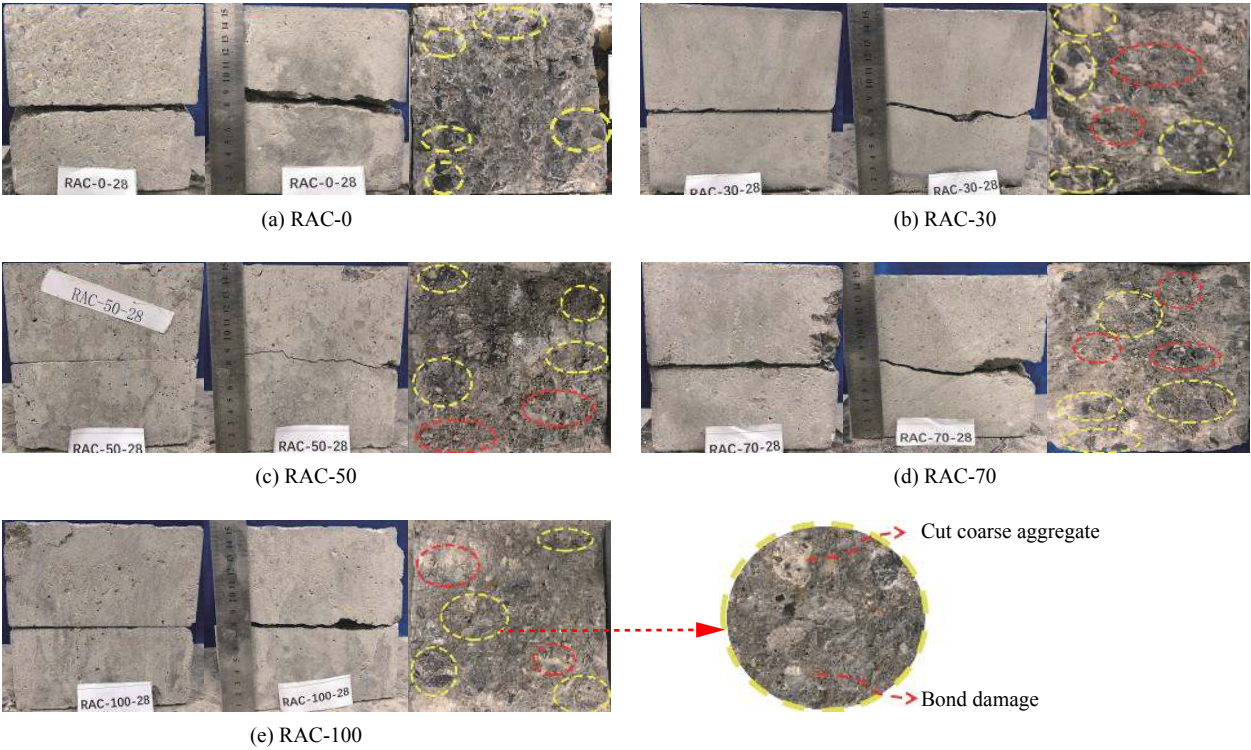


图2 RAC直剪破坏形态

Fig. 2 Damage patterns of direct shear of RAC

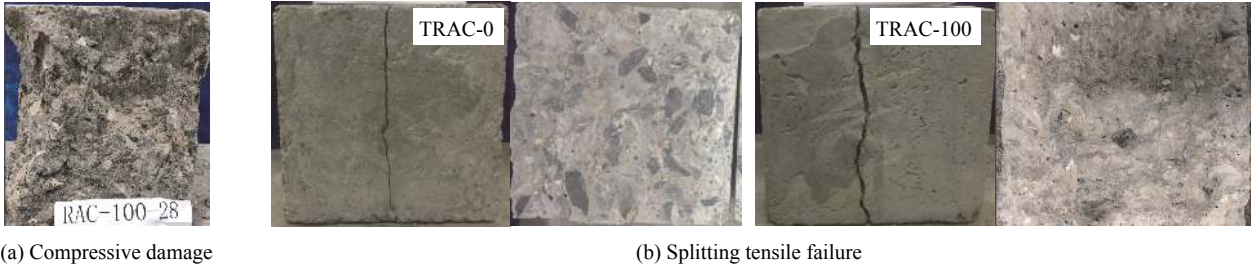


图3 RAC的抗压和劈裂破坏形态

Fig. 3 Damage patterns of resist compression and tensile strength of RAC

身断裂及骨料-水泥基体界面的粘结破坏，但劈裂破坏断面图中骨料脱落或断裂以后均保持着一定的完整性。因此，直剪的破坏程度要远比劈裂破坏的程度要大。

2.2 RAC 直剪荷载-位移全过程曲线

图 4 为 RAC 试件的剪切荷载-位移全过程曲线。可以看出，RAC 剪切荷载-位移曲线均经历了上升段、下降段和收敛段：(1) 上升段，从开始加载至约 60% 的极限荷载时，剪切荷载-位移约成比例增长，此阶段，主要是由黏聚力 (化学键、范德华力) 来抵抗剪切力 [18]，砂浆内部及砂浆沿着粗骨料界面形成微裂缝，混凝土的宏观变形无变化；当荷载增大，曲线向上微凸，此阶段主要是由黏聚力、骨料咬合力抵抗剪切力，黏聚力随荷载的增大而增大，原有的粗骨料界面裂缝逐渐延伸发展，大量进入水泥砂浆，砂浆中已有的裂缝也加

快发展，并和周围的粗骨料界面裂缝相连，最终连通成为宏观裂缝；混凝土达到峰值荷载时，黏聚力、骨料咬合力达到最大值，这个阶段主要是骨料咬合力占主导地位；(2) 下降段，主要是由骨料咬合力抵抗剪切力，黏聚力次之，砂浆的损伤不断积累，使骨料咬合力降低，切断了砂浆和骨料的联系，宏观裂缝不断扩展延伸逐渐形成一条贯穿的平直裂缝，RAC 试块被剪切成两部分；(3) 收敛段，剪切荷载下降非常缓慢，且相对稳定。该阶段试件已完全破坏，上下试件之间出现相对滑动，剪力主要由剪切面上界面摩擦力抵抗。

图 5、图 6 分别为 RAC 试件的劈裂抗拉及受压荷载-位移曲线。可得，劈裂抗拉荷载-位移曲线存在上升段、下降段，两个阶段，峰值点后存在明显的转折点，荷载急剧下降，说明劈拉破坏的脆性破坏特征较剪切破坏更加明显，试件破坏更突然，无任何预兆；受压荷载-位移曲线上上升段离散性较大，天然混凝土变形模量最大，下降段的光滑性和连续性程度较剪切荷载-位移全过程曲线好。

2.3 RAC 试件特征参数

根据试件的荷载-位移曲线，可得 RAC 各特征点参数。每组数据取 3 个试件的平均值，详见表 3。可见，直剪强度随取代率的增加总体变化不大；随取代率增加，峰值位移 s_p 先减小后增大，变形模量 G_s 先增大后减小。

2.4 RAC 强度指标

为便于分析各强度指标随取代率的变化规律，将强度指标进行无量纲化处理，得到归一化抗压强度 $\alpha=f_{cu}^r/f_{cu0}$ 、抗剪强度 $\beta=\tau_p^r/\tau_{p0}$ ， τ_p^r 、 f_{cu}^r 分别

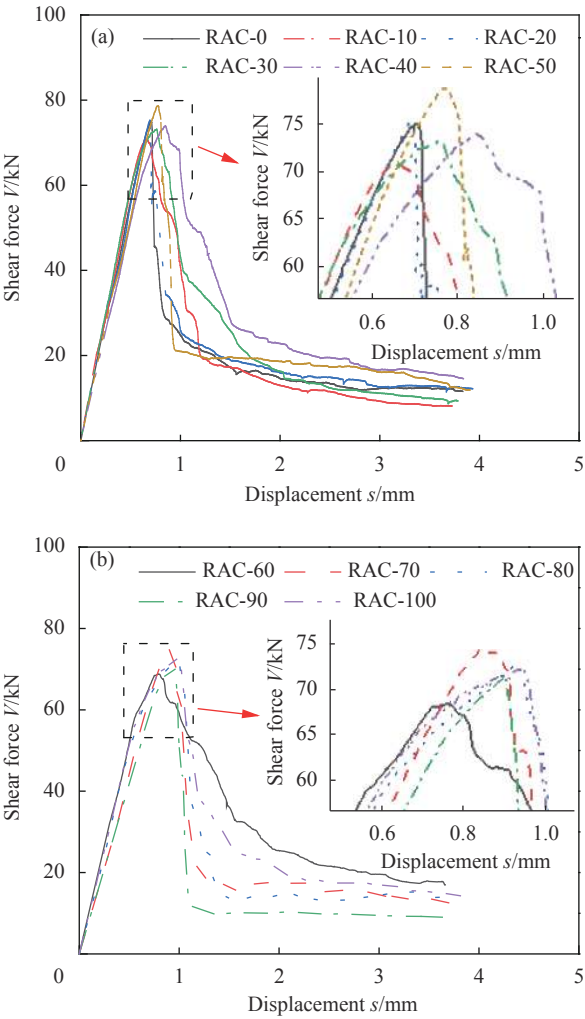


图 4 RAC 的剪切荷载-位移曲线
Fig. 4 Shear load-displacement curves of RAC

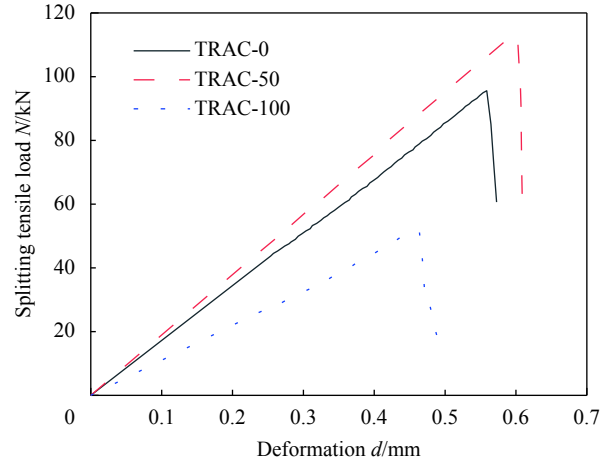


图 5 RAC 劈拉荷载-变形曲线
Fig. 5 Split tensile load-deformation curves of RAC

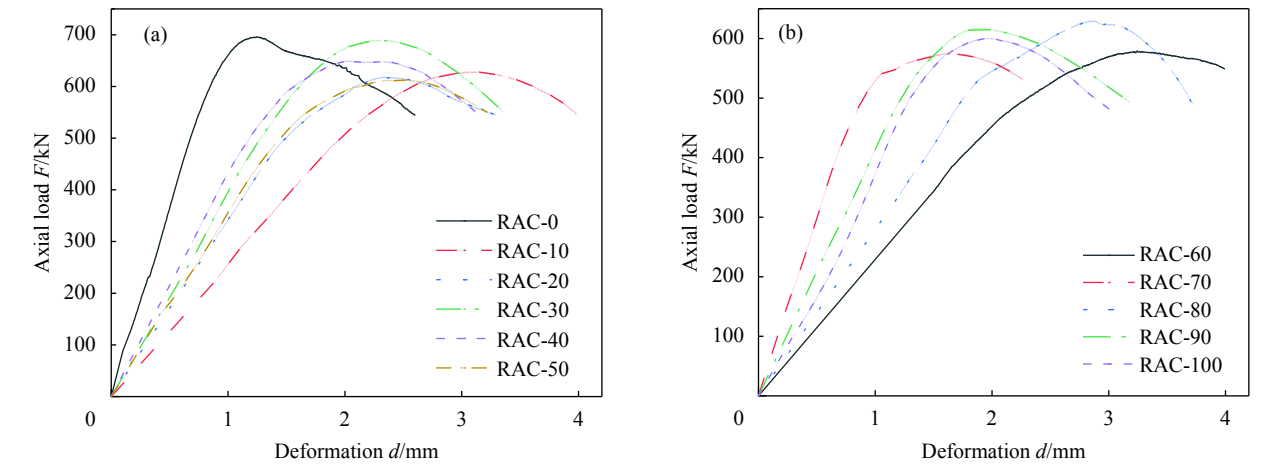


图6 RAC 受压荷载-变形曲线

Fig. 6 Compression load-deformation curves of RAC

表3 RAC 试件特征点参数
Table 3 Feature parameters of RAC specimens

Code	$r/\%$	f_{cu}/MPa	f_t/MPa	τ_p/MPa	s_p/mm	$G_s/(10^2\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$
RAC-0	0	30.93	2.71	3.33	0.704	1.155
RAC-10	10	28.01	—	3.15	0.657	1.286
RAC-20	20	27.46	—	3.35	0.693	1.202
RAC-30	30	30.63	—	3.25	0.762	1.211
RAC-40	40	28.85	—	3.29	0.849	1.033
RAC-50	50	27.45	3.21	3.49	0.777	1.086
RAC-60	60	26.04	—	3.12	0.794	1.057
RAC-70	70	25.74	—	3.33	0.893	0.836
RAC-80	80	27.96	—	3.25	0.981	0.946
RAC-90	90	27.52	—	3.20	0.957	0.835
RAC-100	100	26.67	1.61	3.19	1.004	1.022

Notes: f_{cu} —Compressive strength; f_t —Splitting tensile strength; $\tau_p = V_p/A_s$, τ_p —Shear strength, V_p —Direct shear peak load; A_s —Shear area (150 mm×150 mm); s_p —Specimen reaching the peak deformation corresponding to the peak shear load; G_s —Secant modulus corresponding to $0.4V_p$.

表示骨料取代率为 r 的 RAC 直剪、抗压强度， τ_{p0} 、 f_{cu0} 分别表示天然混凝土直剪、抗压强度。图 7 为 RAC 直剪和抗压强度对比图。可见，随着取代率增大，RAC 直剪强度总体上略有降低，较普通混凝土平均降低 2.04%。其原因主要与再生粗骨料本身的特性有关，由于再生骨料表面附着有一定的旧水泥基体，当取代率增大时，砂浆与骨料之间的粘结强度越低，其 RAC 界面过渡区越薄弱 [19-20]，导致其在受剪过程中，直剪面成为受剪作用下最薄弱的面，从而导致 RAC 在直剪作用下剪切强度有所降低的情况；但当取代率为 50% 时，直剪强度较普通混凝土提高 4.8%，这可能是由于再生粗骨料吸水率较大，导致 RAC 实际“水胶比”变小，缓解 RAC 界面过渡区薄弱现象，提高骨料与砂浆之间的粘结强度，使 RAC 直剪强度有所提

高；还可发现，RAC 抗压强度随取代率增大总体呈降低趋势，较普通混凝土平均降低 10.66%，这可能是由于再生骨料表面黏附的水泥基影响骨料界面质量，且再生粗骨料内部存在大量微裂纹导致抗压强度降低。

2.5 RAC 峰值剪切位移

将 s_p 进行归一化处理可得到 RAC 峰值剪切变形 $\zeta = s_p^r/s_{p0}$ ， s_p^r 表示骨料取代率为 r 的 RAC 峰值剪切位移， s_{p0} 表示天然混凝土峰值剪切位移。图 8 为不同取代率下 RAC 峰值剪切位移对比图。可见，当取代率为 10wt%、20wt% 时，RAC 的 s_p 较天然混凝土分别降低 6.61%、1.49%，这可能是由于再生粗骨料本身存在的微裂缝，在受力时使试件承压面的约束作用降低，加速了混凝土破坏，导致 s_p 降低；当取代率为 30%~100% 时，RAC 峰值剪

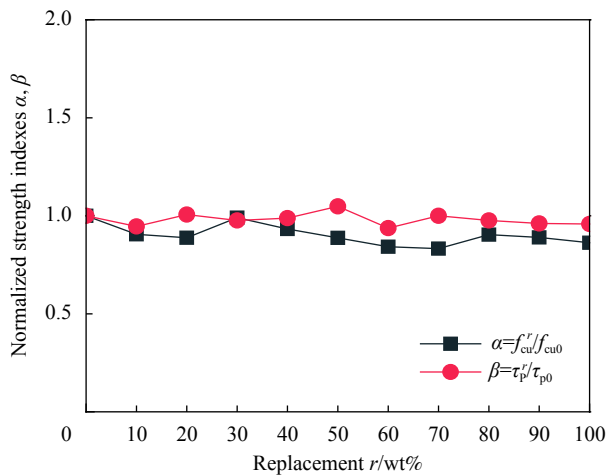


图7 RAC直剪和抗压强度对比

Fig. 7 Comparison of direct shear and compressive strength of RAC

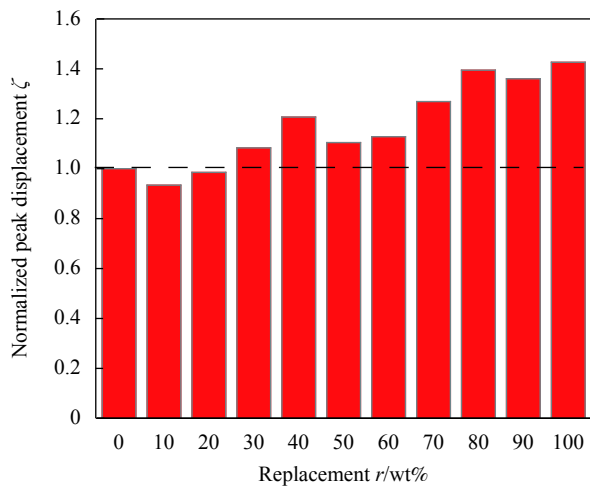


图8 RAC峰值剪切位移

Fig. 8 Peak shear displacement of RAC

切变形波动范围较大,较天然混凝土平均提高18.85%,原因可能在于粗骨料表面黏附的水泥基实际上增加了RAC中的胶凝体含量,随着胶凝体含量的增加,试件的峰值剪切变形会有所增大^[21]。

2.6 RAC初始剪切变形模量

图9为RAC归一化剪切变形模量 ξ 对比图, $\xi=G_s'/G_0$, G_s' 表示骨料取代率为 r 的RAC剪切变形模量, G_0 表示天然混凝土剪切变形模量。可见,随取代率增大,变形模量总体降低,平均降低了8.97%,这是由于RAC直剪强度降低,因此剪切变形模量降低。

3 RAC强度指标换算关系

3.1 RAC抗压强度-直剪强度换算

根据试验实测结果可得直剪强度与抗压强度

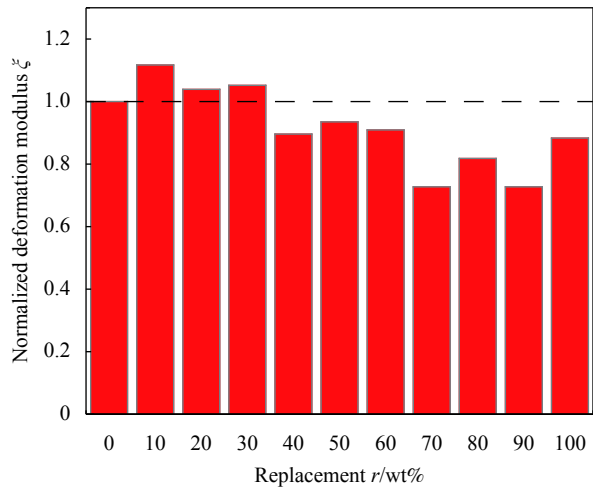


图9 RAC初始剪切变形模量

Fig. 9 Initial shear deformation modulus of RAC

关系,考虑到取代率对RAC直剪性能的影响,提出了抗压强度与抗剪强度的换算公式:

$$\tau_p/f_{cu} = k_r \quad (1)$$

$$k_r = ar^2 + br + c \quad (2)$$

式中: f_{cu} 为28天立方体抗压强度; K_r 为RAC取代率影响系数; r 为再生粗骨料取代率; a 、 b 、 c 为变化参数。

图10为抗压强度与直剪强度拟合曲线图。通过对试验数据进行回归分析,可得RAC的抗压强度与直剪强度之间的换算公式:

$$\tau_p = (-0.0124r^2 + 0.0213r + 0.1108)f_{cu} \quad (3)$$

采用上述公式计算本文试件并与实测值对比,如表4所示。可见,计算值与实测值比值的平均值为1.001、方差为0.003、变异系数为0.052,计

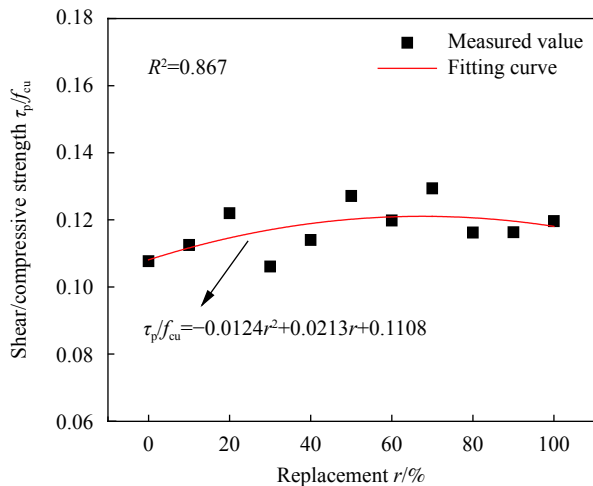


图10 RAC抗压-抗剪强度拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of compressive-shear strength of RAC

表 4 RAC 抗剪强度的计算值与实测值对比

Table 4 Comparison of calculated and measured direct shear strength of RAC

r(by mass)/ wt%	Measured value/ MPa	Calculated value/MPa	Calculated value/ Measured value	r(by mass)/ wt%	Measured value/ MPa	Calculated value/MPa	Calculated value/ Measured value
0	3.33	3.43	1.03	60	3.12	3.10	0.99
10	3.15	3.16	1.00	70	3.33	3.08	0.92
20	3.35	3.15	0.94	80	3.25	3.35	1.03
30	3.25	3.56	1.09	90	3.20	3.30	1.03
40	3.29	3.39	1.03	100	3.19	3.19	1.00
50	3.49	3.25	0.93	—	—	—	—

算结果与实测得到的结果吻合较好。

3.2 RAC 劈裂抗拉强度-抗剪强度换算

图 11 为劈裂抗拉强度与抗剪强度拟合曲线图。可见，剪拉比随取代率增大先减小后增大，原因可能在于，RAC 直剪受力过程与劈拉过程类似，但直剪承力面积较劈拉大，受承力面积影响劈拉破坏比直剪更剧烈且迅速，因此其受再生骨料缺陷影响更大。再生骨料表面附着的水泥基会使砂浆与骨料之间的粘结强度下降，使混凝土内部产生细孔，受力时会使得有效受拉面积较小，使劈拉强度降低，这是不利的方面，但附着的水泥基同时又会增加混凝土中的胶凝体材料，使混凝土内部密实，改善界面过渡区结构，提高骨料与水泥砂浆之间的粘结强度，使劈拉强度提高^[22]，这是有利的方面。当取代率为 50% 时，有利的方面大于不利的方面，因此劈拉强度提高，当取代率为 100% 时不利的方面远大于有利的方面，因此劈拉强度较普通混凝土降低。骨料与砂浆之间粘结强度对混凝土抗拉强度的影响大于直剪强度，因此，随着取代率增加直剪强度变化范围不大，劈拉强

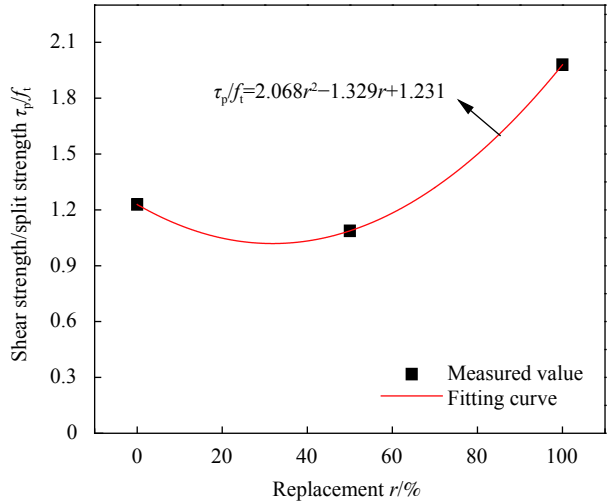


图 11 RAC 劈裂抗拉-抗剪强度拟合曲线

度先增加后降低，剪拉比则呈现先下降后上升的规律。

通过对试验数据进行回归分析，可得 RAC 的 f_t 与 τ_p 之间的换算公式：

$$\tau_p = (2.068r^2 - 1.329r + 1.231)f_t \tag{4}$$

式中， f_t 为劈裂抗拉强度。

4 结论

(1) 再生混凝土 (RAC) 试件直剪破坏为明显的脆性破坏，破坏后试件正面为一条水平直裂缝，侧面为锯齿状贯穿裂缝，破坏形态为骨料与水泥基体界面黏结破坏及粗骨料本身剪断破坏；劈拉破坏过程与剪切类似，但劈裂破坏程度较低。

(2) RAC 的直剪荷载-位移曲线主要分为上升段、下降段、收敛段；其与天然混凝土曲线上上升段基本重合；随取代率的增大，下降段曲线斜率越大；收敛段受取代率的影响不大。

(3) 随取代率的增加，RAC 的直剪强度变化不大，抗压强度均略有降低，劈抗强度先上升后降低；剪切峰值位移随取代率的增加，总体呈增大的趋势，与普通混凝土相比平均提高了 18.85%；初始剪切变形模量随取代率的增加，总体降低，相较于普通混凝土平均降低了 8.97%。

(4) 通过回归分析，提出了直剪强度与抗压强度、劈裂抗拉强度的强度指标关系式，所得计算结果与试验值吻合良好。

参考文献：

[1] MEDINA C, ZHU W Z, HOWIND T, et al. Influence of mixed recycled aggregate on the physical mechanical properties of recycled concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 68: 216-225.

[2] 陈宗平, 陈宇良, 应武挡. 再生混凝土三向受压试验及强度准则[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1): 149-155.

CHEN Zongping, CHEN Yuliang, YING Wudang. Mechanical behavior and strength criterion of recycled aggregate

Fig. 11 Fitting curves of splitting strength-shear strength of RAC

- concrete under triaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1): 149-155(in Chinese).
- [3] 李佳彬, 肖建庄, 黄健. 再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(3): 297-305.
- LI Jiabin, XIAO Jianzhuang, HUANG Jian. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentages on compressive strength of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(3): 297-305(in Chinese).
- [4] LEITE M B, MONTEIRO P J M. Micro-structural analysis of recycled concrete using x-ray micro tomography[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 81: 38-48.
- [5] 商效瑞, 杨经纬, 李江山. 基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(7): 1774-1784.
- SHANG Xiaoyu, YANG Jingwei, LI Jiangshan. Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1774-1784(in Chinese).
- [6] 陈守开, 刘新飞, 郭磊, 等. 再生骨料掺配比对再生透水混凝土性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(6): 1590-1598.
- CHEN Shoukai, LIU Xinfei, GUO Lei, et al. Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(6): 1590-1598(in Chinese).
- [7] 孔祥清, 何文昌, 邢丽丽, 等. 钢纤维-聚丙烯纤维混杂对再生混凝土抗冲击性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(7): 1763-1773.
- Xiangqing, HE Wenchang, XING Lili, et al. Effect of steel fiber-polypropylene fiber hybrid addition on impact resistance of recycled aggregate concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1763-1773(in Chinese).
- [8] 刘凯华. 再生混凝土压剪复合受力性能的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 47-49.
- LIU Kaihua. Experimental study on behavior of recycled concrete under combined compressive and shearing stresses[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 47-49(in Chinese).
- [9] WASEEM S A, SINGH B. An experimental study on shear capacity of interfaces in recycled aggregate concrete[J]. *International Federation for Structural Concrete*, 2018, 19: 230-245.
- [10] LIU B, FENG C, DENG Z H. Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 217: 557-572.
- [11] 邓志恒, 李作华, 杨海峰, 等. 再生混凝土压-剪复合受力性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(5): 174-180.
- DENG Zhiheng, LI Zuohua, YANG Haifeng, et al. Mechanical behavior of recycled aggregate concrete subjected to compression-shear loading[J]. *Journal of Building Structure*, 2019, 40(5): 174-180(in Chinese).
- [12] 王玉梅, 邓志恒, 肖建庄, 等. 再生混凝土压-剪应力下受力性能与破坏准则[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S1): 373-380.
- WANG Yumei, DENG Zhiheng, XIAO Jianzhuang, et al. Mechanical properties and failure criterion of recycled aggregate concrete under compressive-shear stress state[J]. *Journal of Building Structure*, 2020, 41(S1): 373-380(in Chinese).
- [13] 余振鹏, 黄侨, 李富荣, 等. 混凝土剪切多轴受力试验技术与验证[J]. *建筑材料学报*, 2013, 23(2): 460-465.
- YU Zhengpeng, HUANG Qiao, LI Furong, et al. Research and verification of concrete shear multiaxial loading test technology[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 23(2): 460-465(in Chinese).
- [14] 余振鹏, 黄侨, 赵志青, 等. 自密实轻骨料混凝土压-剪复合受力力学性能[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(8): 1894-1994.
- YU Zhenpeng, HUANG Qiao, ZHAO Zhiqing et al. Mechanical property of self-compacting light aggregate concrete under combined compression-shear stress[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(8): 1894-1994(in Chinese).
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 建设用卵石、碎石: GB/T 14684-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Construction Pebble and crushed stone: GB/T 14684—2011[S]. Beijing: China Standards Press, 2012(in Chinese).
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ55—2011[S]. Beijing: China Standards Press, 2012(in Chinese).
- [17] 陈宇良, 刘杰, 吴辉琴, 等. 一种直剪及复合受剪的试验装置: 中国, CN210604212U[P]. 2020-05-22.
- CHEN Yuliang, LIU Jie, WU Huiqin, et al. Test device for direct shear and compound shear: China, CN210604212U[P]. 2020-05-22(in Chinese).
- [18] YU Z P, HUANG, XIE X H, et al. Experimental study and failure criterion analysis of plain concrete under combined compression-shear stress[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 179: 198-206.
- [19] LI W G, XIAO J Z, SUN Z H, et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 35: 1045-1055.
- [20] RAJHANS P, PANDA S K, NAYAK S. Sustainable self-compacting concrete from C & D waste by improving the microstructures of concrete ITZ[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 557-570.
- [21] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. *建筑材料学报*, 2013(1): 28-36.
- CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress strain constitutive relations of recycled coarse aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2013(1): 28-36(in Chinese).
- [22] KOU S C, POON C S, WAN H W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 36: 881-889.